

4.3.3 Zusammenfassung 4.3

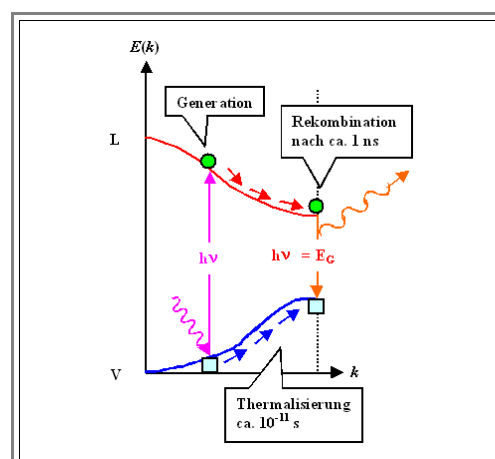
- ▶ Band-Band Übergänge werden möglich, falls ein Elektron im Valenzband mindestens die Energie E_G "zur Verfügung" hat. Dies folgt aus dem *Energieerhaltungssatz*.
 - Die notwendige Energiezufuhr kann sowohl von *Phononen* (= thermische Energie kT) als auch von *Photonen* (= Licht) stammen.
 - Das dann im Leitungsband "sitzende" Elektron kann sich über die vielen freien Plätze sehr schnell "*nach unten*" in das Leitungsbandenergie*minimum* begeben; die Überschußenergie geht als Wärme ans Gitter. Dieser Prozeß heißt "*Thermalisierung*" oder dielektrische *Relaxation*; er benötigt typischerweise 10^{-12} s.
- ▶ Im Valenzband ist jetzt ein freier Platz; ein "*Loch*". Diese Loch wandert ebenfalls sehr schnell "*nach oben*" zum Valenzbandenergie*maximum* - indem Elektronen "nach unten" in das Loch fallen.
- ▶ Bei Band-Band-Übergängen ist aber *wie immer* außer der Energieerhaltung auch die *Impulserhaltung* zu beachten.
 - Die Differenz aus Impuls vorher - Impuls nachher ist proportional zu $\underline{k} - \underline{k}'$; sie muß vom Kristall "übernommen" werden.
 - Der (quantenmechanische) *Kristallimpulserhaltungssatz* ist einfach die *Braggbedingung* aber jetzt auch für *unelastische* Streuung::

$$\underline{k} - \underline{k}' = \underline{G}$$

$$|\underline{k}| \neq |\underline{k}'|$$

$$\underline{G} = \text{reziproker Gittervektor}$$

- Damit sind Band-Band-Übergänge in der Dispersionkurvendarstellung "geometrisch" festgelegt; nur Übergänge zwischen exakt definierten Zuständen sind möglich.
- ▶ Das läßt sich graphisch sehr leicht darstellen indem man die Dispersionkurven in ein *reduziertes Banddiagramm* einträgt.
 - Jeder Zweig der Dispersionkurve wird um den zur **BZ** gehörenden reziproken Gittervektor Richtung Ursprung verschoben; dann landet jeder Zweig in der **1.BZ**
 - Man spart damit nicht nur Platz, sondern hat eine einfache Darstellung der Kristallimpulserhaltung: Nur "senkrechte" Übergänge sind erlaubt.
- ▶ Je nach genauer Struktur der Dispersionkurven gibt es für die reduzierte Bandstrukturdarstellung zwei grundsätzlich verschiedene Grundstrukturen:
 - 1. Valenzbandenergie*maximum* und Leitungsbandenergie*minimum* liegen senkrecht übereinander. Das sind dann die *direkten* Halbleiter.
 - 2. Valenzbandenergie*maximum* und Leitungsbandenergie*minimum* liegen *nicht* senkrecht übereinander. Das sind dann die *indirekten* Halbleiter.
- ▶ Elektronen werden nicht für ewig im Leitungsband bleiben - sie rekombinieren nach einer typischen Zeit die *Lebensdauer* heißt mit einem Loch im Valenzband. Auch für diese *Rekombination* gilt der Energie- und (Kristall)impulserhaltungssatz.
 - Für direkte Halbleiter ist Rekombination problemlos möglich. Impulserhaltung ist gegeben, da der Rekombinationsübergang senkrecht nach unten führt, Energieerhaltung wird durch Aussendung eines Photons gewährleistet.
 - Der gesamte Kreisprozeß aus Generation, Thermalisierung und Rekombination ist im Bild unten in allen Details dargestellt.



- ▶ Nach der Thermalisierung steht das Elektron (und das Loch) nicht still, sondern "diffundiert" mit einem "random walk" durch den Kristall.
 - Wir sind jetzt im "Teilchenbild", aber auch im "Wellenbild" läuft das Elektron hin und her; der "Zufall " des Random walks kommt durch ständige Streuprozesse an den im realen Kristall vorhandenen Defekten. Das Teilchenbild ist jetzt vorteilhafter als das im freien Elektronengas bemühte Wellenbild.
- ▶ Nochmal: Während ihrer Lebensdauer τ stehen die Teilchen nicht still, sondern laufen in einem "random walk" durch den Kristall. Es gelten die alten Beziehungen zwischen Zeit der Wanderung (= *Lebensdauer* τ), *Diffusionskoeffizient* $D_{e,h}$ (ein neuer Materialparameter) und *Diffusionslänge* L (= zurückgelegte Strecke zwischen Geburt und Tod)

$$L = \left(D_{e,h} \cdot \tau \right)^{1/2}$$

- Bei indirekten Halbleitern ist τ und L klein (**ns** und **nm**), bei indirekten Halbleitern tendenziell groß (**ms** und **mm**). Allerdings sind beide Größe extrem sensitiv auf geringste Spuren von Defekten/Verunreinigungen; "dreckiges" **Si** (mit Verunreinigunggehalten im **ppb** - **ppm** Bereich) hat sehr viel kleinere Lebensdauern und Diffusionslängen.
- ▶ Ob ein Halbleiter direkt oder indirekt ist, zeigt sich auch in seinem Absorptionsverhalten als Funktion der Wellenlänge.